

文章编号:1001-4810(2006)增刊-0035-08

天坑释义^①

朱学稳¹, Tony WALTHAM²

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 2. Nottingham Trent University, UK)

摘要:天坑是一种特大型塌陷漏斗, 它的演化包括大型洞穴厅堂的洞顶崩塌和大型暗河对大量崩塌块石的搬运。天坑这个术语, 首先在中国使用, 随后成为世界性的喀斯特词汇。

关键词:喀斯特; 漏斗; 天坑; 中国; 释义
中图分类号:P931.5 **文献标识码:**A

0 前言

天坑(tiankeng), 作为特大型塌陷漏斗, 在中国不论是科学价值重要性方面还是作为自然奇观进行旅游开发所带来可观的经济价值方面都得到了认同(朱学稳, 2001)。这一术语作为国际喀斯特词汇中新成员的提议, 会逐渐被接受和认可。

“Tiankeng”由中文“天坑”音译而来, 大致相当于英文的“Sky hole”, 或“heaven pit”, 或这两个词的一些相似意义的词。拼音的拼法与中国口语并不一致, 因此天坑的正确的发音更象 tienkung。“天坑”一词也是从中国各处各种称谓的大漏斗名称中挑选出来的。

天坑是可充分显示其名称特色的一种喀斯特景观, 其含义是宽度和深度不小100m的塌陷漏斗, 并由大型洞穴崩塌而成。不管怎样, 天坑需要适当地解释和充分地描述, 其定义又必须是地貌学的。所以应在景观地貌学(和形态测量)及成因与发育(在地貌学和水文地质学背景中)两方面加以考虑。关于中国天坑(朱学稳和陈伟海)和世界其它地方天坑(Waltham)的实例, 在本专集的有关论文中均有简要的描述。

1 天坑定义

在喀斯特的各种现象中, 特别是在所谓的大型漏

斗、洼地、竖井中, 何谓“天坑”? 在科学上是必须加以界定的。根据现阶段的研究与认识, 天坑定义可简述如下:

具有巨大的容积、陡峭而圈闭的岩壁、深陷的井状或桶状轮廓等非凡的空间与形态特征, 发育在连续沉积厚度及其含水层包气带(vadose zone)厚度均特别巨大(地下水位深埋)的可溶性岩层(以碳酸盐岩为主)中, 从地下通向地面, 平面宽度与深度从大于100m至几百米以上, 底部与地下河相连接(或有证据证明地下河道已迁移)的一种特大型喀斯特负地形。此外, 在观赏方面是否具有稀有、壮观、雄奇、险峻、生境独特和生物多样性等综合属性, 也应该被认为是鉴别天坑与一般漏斗、洼地或竖井的重要标志。失去地下河行迹或周壁的完整性遭受严重破坏的天坑, 可称为退化(剥蚀)天坑(degraded tiankeng)。

2 天坑形态学

在形态学术语中, 天坑是一个深度和宽度均大于100m的塌陷漏斗, 并由直立的周壁而构成陡峭的剖面。中国的大石围天坑和波多黎各(Puerto Rico)的Tres Pueblos Sinkhole可称得上是典型范例。

2.1 天坑尺寸

虽然有必要限定天坑的最小尺寸, 以作为天坑的鉴别特征, 但最小尺寸并非严格限定在100m。对天坑

① 基金项目: 重庆和广西旅游开发项目及中英探险项目基金资助
第一作者朱学稳(1932—), 男, 研究员, 主要从事洞穴科学研究。
收稿日期: 2006-03-10

的定义应该慎重理解,尤其那些非常明显的塌陷漏斗,不能因为仅一维尺寸欠长而排斥在天坑之外。对边缘退化和圆化的天坑可取近似度测量其直径或长度或宽度,少数非常新鲜地形除外。天坑深度本来是很容易测量的,然而在中国却偏向于从天坑边缘最高点取值。天坑边缘切割峰丘的地方与天坑的最小深度,即一般西方人偏向于从天坑边缘最低点的取值相差甚大。一般来说,最小尺寸 100m 的限定也适用于天坑的最大深度,但值得注意的是这个数值应把任何特殊地貌地形特点真正反映出来。塌陷形成的较小洼地最好视为大型塌陷漏斗。正是这种巨型形态将天坑与特殊形成条件联系起来,与其它类型塌陷漏斗区分开来。天坑的最小容积可能是依据形态量计定义天坑的较好的一个办法。可是,天坑体积数据只是一个近似值,因为漏斗和天坑的岩壁剖面一般难以进行非常详细的测量。一个最小深度和直径的标准圆柱体的体积是 80 万 m^3 ;而实际上最小尺寸的天坑的体积约 1Mm^3 。

天坑的深/宽比(d/W)介于 0.5~2.0 之间($0.5 < d/W < 2.0$),这里数据是指从天坑边缘面上测量的天坑最大宽度、长度或者直径。再者一些尺寸限定可自行选择。对深度明显大于两倍宽度($d/W > 2$)的多数喀斯特洼地最好作为竖井来描述,因为在成因上来讲,其起源的主要作用是落水溶蚀,而非岩石崩塌。对于那些或者明显退化或者具有多重特征的天坑,其深/宽比相对较低。退化天坑如新不列颠的 Lusé 天坑,在天坑部分侧面上仅有有限的崖壁残余。多重特征天坑如重庆的青龙天坑,是一系列大型洞穴厅堂的崩塌合并而成。虽然宽深比因此变得很高,但其三维数据和纵断面却保留了天坑的特征。另外一些具有这些深度/宽度比率的大型喀斯特洼地,包括大型溶蚀漏斗,某些坡立谷和那些起源不明的超级漏斗(mega-dolines),因为缺乏天坑形成中的塌陷机制不能视为天坑。所有浅洼地($d/W < 0.2$)都没有理由像天坑那样去描述。

虽然典型天坑的顶底直径比(W_t/W_b)介于 0.7 和 1.5 之间($0.7 < W_t/W_b < 1.5$),但这些限定也不是极其严格而且解释也不是没有余地。理想天坑的直立周壁形成的准确比值是 1。中国各种天坑的 w_t/w_b 在 1.5~2.0 范围之内,而新不列颠的 Lusé 其比率大约为 2。由于裙状碎屑堆积日益掩埋天坑圆形坑底,故很难确定退化型天坑坑底尺寸。相反地,一个不完全的洞顶顶部塌陷形成的可看作是未成熟的天坑,其 $W_t/W_b < 0.7$ 。墨西哥的 Golondrinas 虽然露出地表开口很大,但其下大竖井周壁却凹入,结果其 W_t/W_b 比值

约为 0.15。同少数其它地方天坑一起, Golondrinas 可视为未成熟的天坑。广西乐业的冒气洞,可看作是一个原生天坑(proto-tiankeng),其中大竖井深 300m,宽 200m,但在其拱形圆顶上仅有一个小天窗,因此 $W_t/W_b < 0.05$ (图 1)。

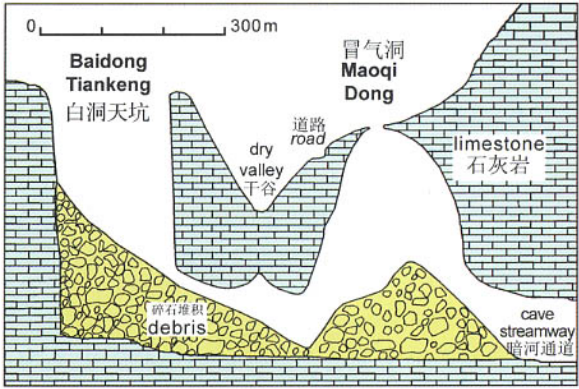


图 1 白洞天坑和临近的冒气洞天窗大厅间洞穴剖面图
(碎石堆以下基岩剖面为推测剖面)

Fig. 1 Section through Baidong Tiankeng and the adjacent skylight chamber of Maoqi Dong which may be regarded as a proto-Tiankeng; the bedrock profile beneath the debris piles is conjectured.

2.2 天坑剖面

一个天坑,可通过天坑周壁的大部分直立或近直立的岩壁和较大深度来识别。其中最明显的证据是崩塌起源,虽然这些崩塌可能是由于下伏洞顶崩塌或者随后的岩壁后退引起。但对一个塌陷天坑来说,其崩塌成因的证据会仍然是十分明晰可辨的。如坑壁上可能有崩塌三角面存在和坑底有大量的碎屑堆积等。需要特别注意鉴别的是:天坑崩塌壁的不同水平上,可能会出现某些化石洞穴,甚至是地下古河道遗迹。它们是被后期天坑发生时崩塌作用揭露出来的,一般地说与天坑本身并无成因上和形成历史上的系统关系。因为在地壳上升、河道深切、含水层包气带厚度随之不断增加的过程中(大天坑形成的前提条件),接近当时饱水带位置而发育的地下河的行迹,在空间和时间上的变迁都是极其频繁的。例如,广西乐业大石围天坑崖壁上的马蜂洞古河道,就没有根据将其成因和发展史与大石围天坑的形成联系起来。天坑周边陡壁的形成与岩性及地质构造关系十分密切。坚硬块状的和产状平缓的岩层,有利于高、大、深峭壁的形成。也可偶见到岩层倾角大于 45° 的天坑,在此情况下,主要坑壁就是岩层的层面,天坑的性状也多是长度显著大于宽度。视觉景观上壮丽辉煌的天坑,一是空间庞大而深邃,但主要是周壁封闭而完美(图 2)。广西乐业的黄

猿洞天坑和新不列颠的 Minyé 是最好的实例。

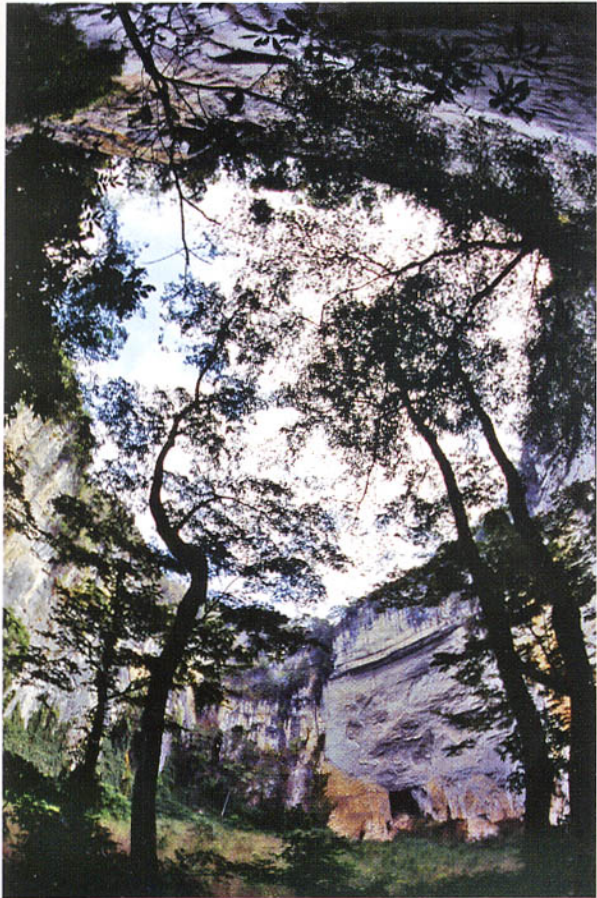


图 2 广西乐业黄猿天坑直立崖壁的完整边缘，从坑底向上广角仰望

Fig. 2 The complete ring of vertical cliffs of Huangjing Tiankeng, Guangxi, seen in a very wide upward view from the floor.

失去周边陡壁有意义的均衡状态的天坑是退化天坑。由风化和连续的岩崩造成暴露面的失去或破坏是不可避免的。同时，陡壁的基部还会为裙状的碎屑堆所掩埋。而活动的天坑，其岩崩形成的碎屑堆积在陡崖之下，如重庆奉节的小寨天坑和斯洛文尼亚的 Velika Dolina。但这些天坑地下河的活动能力目前已经较弱，或者接近失去输出能力，故崩塌堆积的储集量依然较大。累进的恶化，看来会使陡壁的高度减小，或许还会受到沟溪发育的破坏。这便是从一个天坑如 Naré（新不列颠），到退化天坑如大坨（广西乐业），最后成为巨型漏斗如 Garden of Eden (Sarawak) 不可避免的演化过程。而在这三种状态之间是没有明确的界线的（见下文）。

天坑底部的基岩，其大部或全部不可避免地被后期崩塌成因的碎屑堆积所掩埋。这可能是单一的从洞穴顶部破坏崩溃而来的单一的岩堆或斜坡。较通常

是衰退坑壁所堆积的扇或裙的连续聚集。某些活动天坑坑底有一条露出的地下河，而另一些地下河只从坑底的碎屑堆积层中流过。当然，在这种情况下，人们是难以直接接近的。当多数剥蚀天坑不再有任何地下河迹象存在时，如重庆武隆的青龙天坑，仅在碎屑堆斜坡控制之间，有一条很小的或很不相称的小河水流动。洞穴通道出口，可能是任何天坑的一个特征，但通常在岩崩碎屑堆积之后。这可能包括坑底洞穴活动的进口和出口，同时也应包括高位上较老的洞穴通道，如四川兴文的小岩湾。

3 天坑发育

天坑是一个形成于大型暗河通道上的塌陷地形。它可能是单一的大型厅堂塌陷发育的结果，如重庆小寨天坑的情况；也可能是一系列通道结合部塌陷发育的结果，包括通过不同年代洞穴通道塌陷的叠加，如四川兴文的小岩湾。一般来讲，洞穴顶部塌陷包括长期的洞穴顶蚀作用 (roof stoping) 和洞腔的向上扩展。在这漫长的过程中，洞顶的逐渐崩塌造成压力拱下面张力带上的少量岩崩，从而在岩石生成空间形成稳定的洞穴穹顶。然后可能发生洞顶最终塌陷直达地表的单一事件，也可能是多重小规模塌陷复合造成地表塌陷。这些都需要我们在今后深入地加以研究。如有些天坑由于沿着大型暗河通道塌陷而成，天坑呈长条形，如重庆武隆的青龙天坑和贵州的大槽天坑便是很好的实例（图 3）。一些天坑的特大规模表明它们是多重崩塌的结果，因为这类天坑的尺寸远远大于已知的地下洞穴大厅的规模，而且其大部分体积可以由坑底碎石的溶蚀和侵蚀搬运得到解释。许多天坑的圆形形态很可能是崖壁后退演化的结果（应力分配有利于崩塌而形成稳定的圆形）。

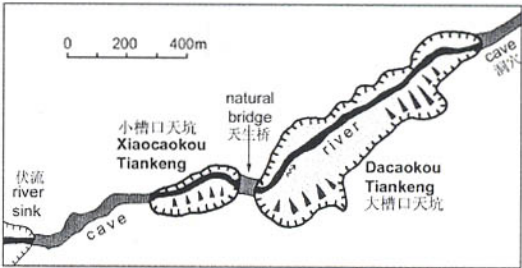


图 3 沿义井地下河发育并由天生桥分开的贵州大槽口和小槽口天坑

Fig. 3 The Tiankengs of Dacaoakou and Xiaocaokou, separated by a natural bridge, all formed along the course of the Yijie underground river in Guizhou.

许多观察表明,天坑的出露,与石灰岩层一个或多个的脆弱构造有关,特别是次直立的断层和节理。重庆奉节的小寨天坑就是如此,其地下河在坑底横穿次直立的裂隙,看起来像是小位移断层(图4)。这些构造有助于通过顶蚀作用促使纵向扩展,和通过岩壁后退和塌陷复合作用促使侧向扩展。这种构造对天坑来说无论如何都不是唯一的,因为几乎所有洞穴通道和洞厅都是在某些形式的构造软弱带上发育的。

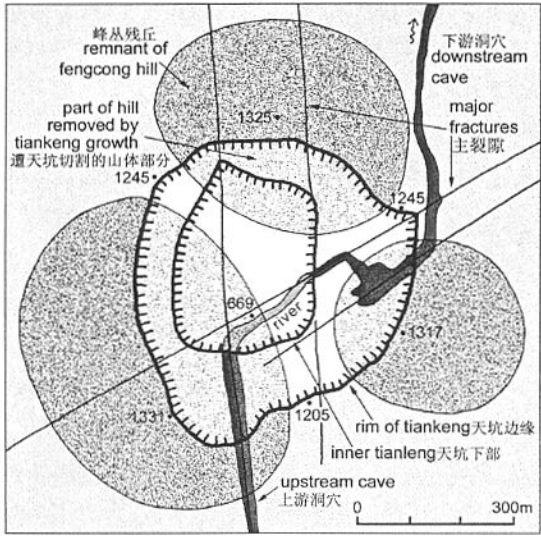


图4 重庆小寨天坑的构造解释。据裂隙发育观察,天坑形成初期可能位于地缝暗河之上和喀斯特峰丛三个山丘间的漏斗之下。裂隙行迹是简化的。沿着洞穴通道的裂隙是多个裂隙组,SW-NE 向裂隙成雁行系列破坏

Fig. 4 Structural interpretation of Xiaozhai Tiankeng, Chongqing, with the observed fractures that may have initiated Tiangkeng development over the Difeng cave river and beneath a doline between three hills within the fengcong karst. The fracture traces are simplified; those along the cave passages are multiple fracture sets, and the SW-NE fractures may break into en echelon series.

活动天坑的基本要素是有一条大型的地下河,这是唯一搬运极其大量崩塌物质的路径,搬运方式可能是溶蚀搬运或者碎屑物质的机械搬运。虽然这种地下河通常是包气带地下河,但其水流可能是饱水的(潜水的)。地下河的侵蚀能力取决于逐渐的顶蚀作用和岩壁崩塌产生的崩塌块石量。通过崩塌堆积的陡的水力梯度也有助于溶蚀和侵蚀速率的提高(Palmer and Palmer, 本专集)。大型坑壁的暗蚀是热带洞穴共有的,其地下水流动倾向于在一崩塌碎石堆中缓行,这有助于洞穴厅堂的扩大,天坑也是如此。壁蚀(wall undercutting)同样提高洞穴通道外侧的侵蚀率,就像重庆小寨天坑那样。顶蚀作用和地下河搬运是天坑发育中的协同作用(synergistic),这种协同只有在顶蚀作用和地下河搬运都大规模地活动时才起作用。

天坑与大型暗河之间的关系使得它们与湿热环境或者其它有外源水汇入形成大型暗河通道的气候环境密不可分。这个标准也将天坑与其它大型塌陷地形区分开来,包括蒸发岩之上的岩盖塌陷(caprock collapses, 如在加拿大和俄罗斯)和热液洞穴之上的大型塌陷(如在阿曼),这些都不能归为天坑。

位于委内瑞拉的 Sarisarinama 是一圆形塌陷大漏斗,它发育于石英岩中,由大规模的碎屑沉积搬运和潜蚀而成。如果它是发育在石灰岩的话,它应该算个天坑,可实际上它也没有与之相关的暗河洞穴。虽然这个大漏斗的演化是一种非常漫长且十分缓慢过程,但对石灰岩天坑的发育却有很多启示。

3.1 包气带天坑的发育

天坑是位于喀斯特包气带露出地表的深坑。活动的天坑底部可能有一条洞穴暗河穿过(或从碎石堆积中穿过);这种洞穴排水系统通常是渗流排水,但有些地方是潜流排水。渗流环境还使洞穴厅堂顶板的应力达到最大,这是因为洞穴大厅顶板失去了完全潜水环境下的水力支撑。当然天坑未必全是渗流地形。在已发现的天坑中,大约有一半天坑没有过境暗河或者直接相关的暗河,但是有一半以上天坑过去肯定与洞穴通道有关,这些通道曾经是搬运物质的暗河,而且有些看不见的暗河可能在坑底的碎石堆积下通过。有些天坑,包括四川的小岩湾天坑,都是大型地下通道崩塌形成的,这些通道中尚无迹象表明它们曾经肯定在包气带演化过。克罗地亚的 Crveno Jezero 有活动的地下洞穴排水系统,在潜水位以下搬运崩塌碎石。

只要排水系统能将足够多的崩塌物质运移,形成露出地表的深坑,任何大型洞穴大厅都可能崩塌形成天坑。而且事实上,所有洞穴和洞穴厅堂的地下起源,都比其排水系统发育要早。包气带露出地表的排水大竖井或者塌陷漏斗的渗流改造是必然的,但是渗流侵蚀未必是天坑形成的主导作用。巴西Lago Azul,与天坑的规模一样,但却不在渗流环境中,因为整个湖中充满了水。可能区域性的再次活动会导致地下水排泄,然后形成一个与墨西哥 Golondrinas 形态十分相似的地形。这也许是早期潜流扩大的一个极端例子——一旦这种地形进入包气带,受渗流侵蚀改造和岩壁崩塌改造,其潜流特征就辨认不出来了。Lago Azul 可能留下了作为原生天坑的特征。这个道理同样适用于墨西哥特深型坑 cenote of Zacaton,不过 cenote of Zacaton 的形成可能部分得益于起源于火山富含硫化氢的侵蚀性水。这就提出一个问题:是否或者在何种程度上,渗流发育应该是天坑的一条重要标准。

问题在于多大程度上,溶蚀漏斗有助于天坑的发育。漏斗的发展会降低洞顶岩层厚度,从而最终促使洞厅崩塌,也更直接将水排向洞厅内,从而增强局部

岩石的溶解。溶蚀漏斗如果与洞穴大厅在同一构造软弱带上发育,则会影响到洞穴大厅发展。如四川兴文的猪槽井洞穴(Waltham, 本专集),其洞穴大厅上面是深溶蚀漏斗,似乎很清楚天坑即将形成。与此相反,在中国,一些陡峭的山坡上出露的天坑,地表却没有可能发育什么大的溶蚀漏斗。中国的许多天坑似乎都是以完全独立的形态出现,这一点从天坑崖壁既切割了地表洼地,又切割了锥状山丘(图 5)可看出来。不过,锥状山丘的切割是天坑扩大、岩壁的崩塌后退引起的。在许多地方,天坑崖壁切割的锥状残丘的分布表明,天坑曾经起源于峰丛区的溶蚀漏斗中央(图 4)。看起来,溶蚀漏斗对许多天坑的发育曾经起过作用,但是这些不是本质特征,最终形成天坑的本质是崩塌的破坏。



图 5 广西乐业大石围天坑扩大切割的峰丛喀斯特残丘
(从第三个残丘侧面看)

Fig. 5 Remains of two fengcong karst hills truncated by expansion of Dashiwei Tiankeng in the Leye karst of Guangxi, seen from the flank of a third truncated hill.

中国南方多数天坑都位于局部相对高差大的非常典型的成熟峰丛喀斯特区,新不列颠和波多黎各的天坑都位于相对高差小得多的喀斯特区,而其它地方的一些天坑却位于没有峰丛的喀斯特区。虽然深切的高峰丛可能是形成天坑的理想环境,但是似乎天坑的发展没有一个绝对统一的条件。

3. 2 冲蚀天坑

作为有别于较常见的一种崩塌型天坑,冲蚀型天坑是另一种天坑类型(表 1),在中国已经得到认可。与崩塌型天坑的区别在于冲蚀型天坑形成于有外源水流的地方,而崩塌型天坑却独立于地表排水外。因此冲蚀型天坑中洞穴暗河只是流出,而并无流入。因此,重庆的箐口天坑是个典范(图 6)。

崩塌和瀑布侵蚀相对所起的作用在不同地方似乎有很大不同。一些大型喀斯特洞穴仅仅是溶蚀竖井的扩大,特别是深度/宽度比率高($d/W>5$)的竖井。导致溶蚀竖井扩大达到冲蚀型天坑的规模,必定有崩塌、竖井合并和/或岩壁后退等因素影响,否则单一瀑布侵蚀作用只能使竖井要么后退进入幽深的峡谷或者凹入形成宽度不足 20m 的竖井。同样地崩塌型天坑也受到流水侵蚀的影响。如雨季时的重庆小寨天坑有三股瀑布冲跌岩壁,不过补给这些瀑布的是直接来自石灰岩的径流。

有些冲蚀型天坑是大型岩盖漏斗,这种天坑是下伏石灰岩中的崩塌穿过非可溶岩岩盖,贯穿到地表形成的。这样,来自岩盖周围的大量外源水汇入这些天坑中,而其它漏斗只接受来自邻近岩盖地表岩层的外源水输入。而且,值得探讨的是,许多其它天坑,尤其广西乐业天坑群中的某些天坑,在岩盖边缘后退之前是否接受了外源水的补给?

表 1 侵蚀型天坑和崩塌型天坑各种特征比较

Tab. 1 Comparisons between the various features of erosional and collapse Tiankengs.		
比较内容	塌陷天坑	冲蚀天坑
大致形态	直立或反倾斜洞壁	直立洞壁
洞壁特征	崩塌痕迹	跌水槽
主导作用	地下崩塌	地表水侵蚀
天坑起源	洞厅崩塌	大型跌水竖井
块石搬运	过境暗河	流出型暗河
发育方向	从地下暗河向上发展	从地表跌水向下发展
与暗河通道关系	先有暗河再有天坑	天坑和暗河同时发育
水文特征	渗流带或者部分潜水带	渗流带
坑底物质	主要崩塌碎石	冲积物和崩塌块石
坑底地形	埋藏暗河或者边缘过境暗河及崩积地形	坑口跌水河床
与地表地形关系	与峰丛、漏斗、谷地或者山丘缺乏相关性。	分布在干谷或者洼地,由地表河流补给
数量	众多	稀少
形成年代(中国)	早更新世以来	晚更新世以来

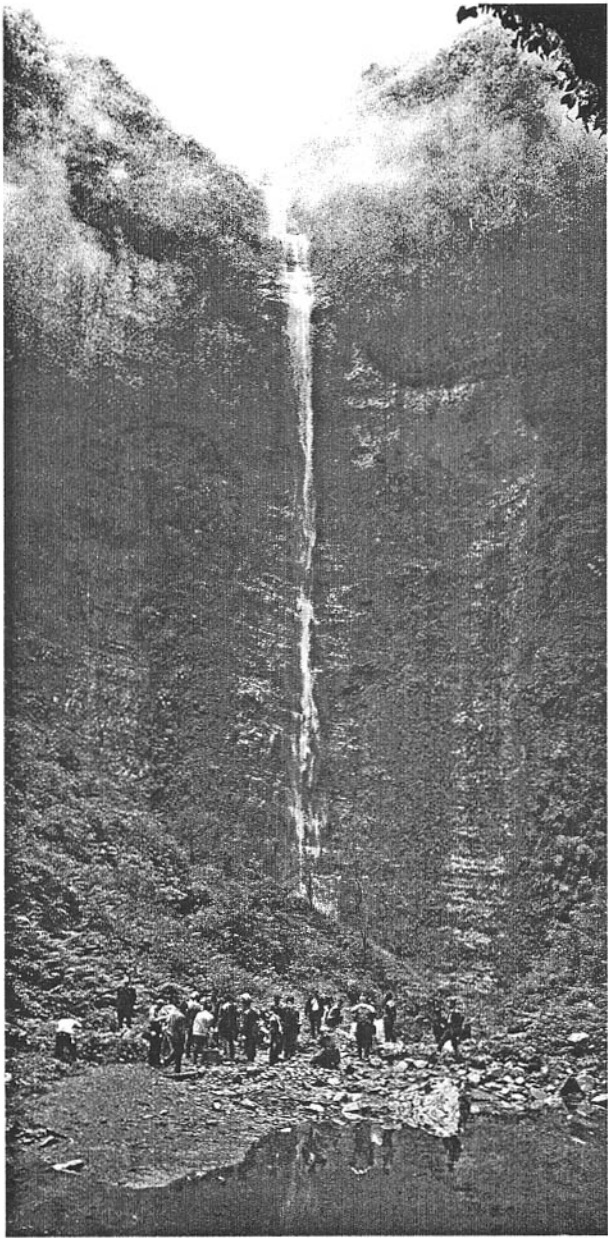


图 6 跌入重庆箐口天坑瀑布之一,落水全部通过大型暗河排走

Fig. 6 One of the waterfalls that cascade into Qingkou Tiankeng (Chongqing), which all drain out through a large stream cave.

因此,把冲蚀型天坑和崩塌型天坑分开就有点不确定了。最好是把两类天坑视为所有条件的终极地形,而崩塌和溶蚀的相对重要性各不相同。这两种作用都有助于天坑的形成。多成因天坑肯定存在的。

3.3 退化天坑

岩壁后退是天坑演化的必然过程,但岩壁后退只是在暗河搬运崩塌块石的时候才有助于天坑的扩大,这在新不列颠数据ukumbu 是不争的事实,当碎块石

的堆积速率超过搬运速率的时候,天坑开始退化,同时越来越多的碎石堆积扇和堆积裙在周壁底部形成,有些岩壁崩塌堆积在早期洞顶崩塌的堆积残余上。退化天坑四周的崖壁渐渐被堆积裙掩埋,天坑边缘降低的同时,宽深比也下降($d/W < 0.5$)。最终,坑底生长的树木掩映了块石堆积。在现有的 74 个天坑中,至少 12 个天坑可以认为是退化的天坑(朱学稳和陈伟海,本专集;Waltham,本专集)。

天坑进入退化甚至更差状态有一个明显的演化过程,最后天坑退化更严重甚至失去了天坑四周几乎所有的崖壁,然后形成一个超级漏斗。很多特大型漏斗都起源于天坑,但问题是,在非常成熟的高起伏峰丛喀斯特区,多深的漏斗起源于天坑?不过,把这些严重退化的天坑说成是大型漏斗是没有什么帮助的,因为这使得天坑的概念变得模糊不清。同样,把天坑视为超级漏斗的一个类型或者演化阶段也是不妥当的,虽然这不是所有超级漏斗的起源。

天坑形成年代需要进一步调查。新不列颠 Nakanai 喀斯特区的大型天坑的形成年代估计在 200 ~ 300 ka,但这只是基于地表整体降低速度的预测(Maire, 1981)。从切割了峰丛喀斯特区的溶蚀漏斗和锥状山丘地形来看,中国的许多天坑是相对较年轻的地形。但是,这个证据只是表面崩塌形成露出地表的天坑的年代,而地下洞穴厅堂的溶蚀和顶蚀发育的年代一定更早。许多天坑仅规模就表明侵蚀搬运浩如烟海的岩石需要非常悠久历史时间。

4 天坑的分类

天坑可以按塌陷型漏斗规模进行分级(Waltham 等, 2005)。如果可以把多数冲蚀型天坑归为岩盖天坑的话,那么天坑也可以按岩盖天坑分级。因其规模特大,岩盖天坑也有别于塌陷漏斗和岩盖漏斗。

可以使用中国已经应用的三级划分(朱学稳和陈伟海,本专集)对天坑进行分类:

- 特大型天坑,直径和深度大于 500m;
- 大型天坑,直径和深度介于 300~500m 之间;
- 常态天坑,直径和深度介于 100~300m 之间;
- 较小相似地形,即大型崩塌漏斗或者岩盖漏斗。

这些尺度并非严格限定。如本来大型天坑的深度和长度都应大于约 300m,可是其宽度可能稍小于这个数字。不规则形状天坑的最大尺度会造成一个规模假象,如重庆的下石院和中石院两个天坑的最大尺度

都达到了大型天坑标准,但天坑顺岩层倾向边坡的倾斜结构,让人觉得相对浅。关于天坑的深度,切合实际的办法应该是从天坑边缘平均高度量起,而不是从最高点量起(如中国文献中引用的那样)。但是这个平均值用处不大。从理论上讲,天坑的深度应该从碎石堆积底部基岩面上量起,但有些地方无法确定这个深度。

也许按天坑体积进行分级可能更精确。缺点是任何精度的体积不那那么容易或方便测量得到(本专集表中引用的多数天坑体积数字都是从底图上进行的非常粗略估计)。常态天坑、大型天坑和特大型天坑的最小体积大约是 1Mm^3 , 10Mm^3 和 70Mm^3 。

中国有些喀斯特地区,天坑已经成为当地文化的一部分。有些被认为深度和直径达 $50\sim 100\text{m}$ 的相似地形,也被认为是小天坑,虽然世界其它地区,只说这种地形是大型塌陷漏斗。因为天坑的定义是大型塌陷漏斗,那么小天坑意味着是“小的大型塌陷漏斗”,在普遍使用这个术语的时候就无法让人接受了。将所有规模小于 100m 的地形纳入天坑概念中减损和降低了天坑作为特色地形的价值。

世界上已发现的天坑共有 75 个,其中中国有 49

个。这些天坑中特大型天坑有 3 个,均在中国。大型天坑有 16 个,有 9 个在中国。其它 56 个天坑属于常态天坑,中国有 37 个。此外,在中国和世界各地还有数以百计的大型塌陷漏斗。中国的世界天坑大国地位已毋庸置疑。

天坑的发育不是简单符合戴维斯演化序列,有时瞬间的洞顶崩塌,就可形成天坑。一个成熟的天坑是以四周近直立的崖壁为特征的(图 7)。一个不成熟的天坑是以悬崖为特点,由于原生洞厅的不完全崩塌,因此,天坑地表开口明显比坑底面积小($W_t/W_b < 0.7$)。在定义年轻天坑时,演化链上的进一步后退没有帮助。虽然有薄层洞顶或者小天窗的大型洞穴厅堂(或者淹没大厅),最终可能形成一个成熟的天坑(proto-tiankeng),但在洞顶崩塌之前,最好称其为原生天坑,因为它还没有表现为一个天坑。一个退化的天坑虽然仍保留其大型规模和许多段悬崖边缘,但是其底部面积远比口部面积小($W_t/W_b > 1.5$);退化天坑底部有大量碎石堆积和天坑四周已形成斜坡,而且没有过境暗河通过。这也可以说是老年期的天坑,但称为退化天坑更为合适。退化天坑和大型或超级漏斗之间没有明显的界限。

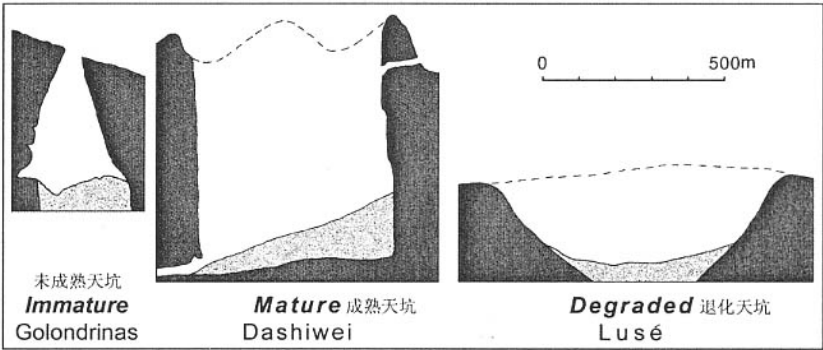


图 7 未成熟、成熟和退化天坑范例剖面比较

Fig. 7 Comparative profiles of good examples of immature, mature and degraded Tiankengs.

5 天坑喀斯特

天坑喀斯特的概念在中国曾经被认为是一个描述极端成熟喀斯特景观类型的术语,这种成熟喀斯特景观在相对高度上已经超过了一般的喀斯特峰丛。这个术语可以用来描述中国广西乐业喀斯特,或许巴布亚新几内亚新不列颠的 Nakanai 喀斯特也可用这个术语描述,这两个喀斯特区都是以天坑群为特色。然而,其它即使是一些成熟的喀斯特区发育的天坑也是寥寥几个,特别是兴文喀斯特区、克罗地亚喀斯特区和墨西哥喀斯特区均只有两个天坑,而且,这使得这

个术语的适用性值得怀疑。天坑喀斯特可能只是用来描述乐业和 Nakanai 的地形,也许,对于喀斯特演化来说,这个术语在地貌学上的地位还没有显示出来。

6 结 论

作为一种重要的喀斯特地貌,天坑的主要特征可以概述如下:

- 天坑是一种特殊的特大型塌陷漏斗;
- 天坑的宽度和深度均不小于 100m ,且宽深比接近单位比;

- 天坑大部分周壁为直立崖壁；
- 天坑是由大型暗河上的大型洞穴厅堂的崩塌形成；
- 地表溶蚀漏斗的降低可能有助于这种崩塌的发生；
- 天坑主要发育于深切峰丛喀斯特区的包气带；
- 有些天坑在一定程度上受外源水的渗流侵蚀；
- 不成熟的天坑底部凹入形成底宽口窄的瓶状；
- 退化的天坑大部分周壁为块石堆积所掩埋。

这些特征构成了天坑适当定义。很难也没有必要学究式地绝对界定大型塌陷漏斗范围,这个范围可能太小或太退化,而认为不是天坑,或者可能是不同成因的天坑。对喀斯特专用术语的国际词汇来说,天坑是个有益的补充。作为一种独特的地貌,天坑适合表现喀斯特区各种漏斗和喀斯特洼地的特色。虽然天坑研究起源于中国,这个术语也适用于其它地方的喀斯特地形。

本文是 2005 天坑考察项目结束时在桂林讨论会

议上的一个议案,草稿当时已分发给全体代表,并通过修正后得到了全体代表的认可。当时在场的代表有 Chen Weihai, Andy Eavis, John Gunn, Julia James, Alexander Klimchouk, Andrej Kranjc, Liu Zaihua, Art Palmer and Will White 和作者。本文因此旨在得到对天坑的研究和工作的国际认可,这项研究工作是由中国地质科学院岩溶地质研究所发起和开展的。

参考文献

朱学稳. 中国的喀斯特天坑及其科学与旅游价值[J]. 科技导报, 2001, (106): 60—63.

朱学稳, 朱德浩, 黄保健, 等. 喀斯特天坑略论[J]. 中国岩溶, 2003, 22 (1): 51—55.

朱学稳, 黄保健, 朱德浩, 等. 广西乐业大石围天坑群发现、探测、定义与研究[M]. 广西科学出版社, 2003, 184.

Zhu Xuwen. Karst Areas and Karst Types in China[J]. Geographische Rundschau International edition, 2005, (2): 37—47.

TIANKENG: DEFINITION AND DESCRIPTION

ZHU Xue-wen¹; Tony WALTHAM²

(1. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, China; 2. Nottingham Trent University, UK)

Abstract: A Tiankeng is a type of very large collapse doline that has evolved by roof collapse over a large cave chamber where a huge mass of breakdown debris has been removed by a substantial cave river. Described first in China, the term “Tiankeng” is recognised as a useful term within the worldwide lexicon of karst.

Key words: Karst; Doline; Tiankeng; China; Definition

(原载《Cave and Karst Science》, 2005, 32(2—3). 75—79. 朱学稳 著译, 张远海 校)